

*Гоманков В.А., студент
6 курс, Департамент морских арктических технологий
Дальневосточный федеральный университет;
Владивосток, Россия*

*Шмыков А.А., старший преподаватель
Департамент морских арктических технологий
Дальневосточный федеральный университет;
Владивосток, Россия*

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ РЕШЕНИЯ ДЛЯ РАЗВЕДОЧНОГО БУРЕНИЯ НА АРКТИЧЕСКОМ ШЕЛЬФЕ

***Аннотация:** Статья посвящена систематизации концептуальных технических решений для разведочного бурения на арктическом шельфе, находящихся на стадии проектирования, патентования или экспериментальной проверки. Проведен анализ инновационных разработок в области искусственных оснований, погружных, полупогружных и самоподъемных буровых установок. Представлена сводная таблица с характеристиками 33 концептуальных сооружений. Сделан вывод о необходимости конвергенции апробированных технологий и инновационных разработок для обеспечения круглогодичного разведочного бурения в высоких широтах.*

***Ключевые слова:** арктический шельф, разведочное бурение, концептуальные решения, гибридные платформы, бионические системы закрепления, термостабилизация грунтов, ледовые нагрузки, динамическое позиционирование.*

*Gomankov V.A., student
6th year, Department of Marine Arctic Technologies
Far Eastern Federal University;
Vladivostok, Russia*

*Shmykov A.A., senior lecturer
Department of Marine Arctic Technologies
Far Eastern Federal University;
Vladivostok, Russia*

ADVANCED CONCEPTUAL SOLUTIONS FOR EXPLORATION DRILLING ON THE ARCTIC SHELF

***Abstract:** The paper presents a systematic review of conceptual engineering solutions for exploration drilling on the Arctic shelf, currently at the stages of design, patenting, or experimental validation. Innovative developments in artificial foundations, submersible, semi-submersible, and jack-up drilling rigs are analyzed. A summary table with characteristics of 33 conceptual structures is presented. It is concluded that convergence of proven technologies and innovative developments is necessary to ensure year-round exploration drilling in high latitudes.*

***Keywords:** Arctic shelf, exploration drilling, conceptual solutions, hybrid platforms, biomimetic anchoring systems, soil thermal stabilization, ice loads, dynamic positioning.*

ВВЕДЕНИЕ

Освоение углеводородных ресурсов арктического шельфа является стратегическим направлением для обеспечения энергетической безопасности России. Однако экстремальные природно-климатические факторы — отрицательные температуры, ледовый покров, штормовое

волнение, короткий навигационный период и удаленность от инфраструктуры — предъявляют уникальные требования к техническим средствам разведочного бурения [1, 2]. Апробированные решения (искусственные острова, ПБУ, ППБУ, СПБУ) имеют ряд ограничений: по глубине моря, ледовой обстановке, несущей способности грунтов и сезонности эксплуатации [3, 4].

В этих условиях особую актуальность приобретают концептуальные разработки, направленные на преодоление ограничений традиционных конструкций. Патентные предложения и исследовательские концепции охватывают широкий спектр инноваций: гибридные платформы с переменной осадкой, модульные конструкции, активные системы термостабилизации грунтов, бионические системы закрепления на слабых грунтах, ледостойкие ППБУ с турельными системами удержания и усиленные СПБУ [5, 6].

Цель настоящей работы — комплексный анализ концептуальных технических решений для разведочного бурения на арктическом шельфе и оценка их потенциальной эффективности для различных сценариев освоения Арктики.

1 КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ: ИННОВАЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ

В данном разделе рассматриваются перспективные разработки, находящиеся на стадии проектирования, патентования или экспериментальной проверки. Анализ базируется на патентных источниках, материалах ЦКБ «Коралл», ЦКБ МТ «Рубин» и зарубежных исследовательских работах [5, 6, 7, 8].

1.1 Концептуальные искусственные острова и основания

Современные патентные разработки в области искусственных оснований направлены на активное управление термомеханическим

состоянием грунтового массива и повышение устойчивости при экстремальных ледовых нагрузках.

Ключевой концепцией является система термостабилизации с тепловыми насосами, позволяющая поддерживать мерзлотное состояние слабых водонасыщенных грунтов при эксплуатации платформ [9]. Принцип основан на использовании термосвай с хладагентом, которые намораживают ледогрунтовой массив вокруг опор, превращая слабый грунт в монолит.

Модульный кессонно-модульный комплекс (КМК) предполагает сборку острова из стандартизированных железобетонных секций, доставляемых на буксирах, что сокращает сроки монтажа на 40% [10, 5]. Конструкция позволяет многократное использование элементов на разных объектах.

Разрабатываются гибридные гравитационно-свайные основания, сочетающие широкую опорную плиту для распределения нагрузки и короткие сваи для восприятия горизонтальных ледовых сил [11]. Такое решение эффективно на слабых илистых грунтах, характерных для Карского и Охотского морей.

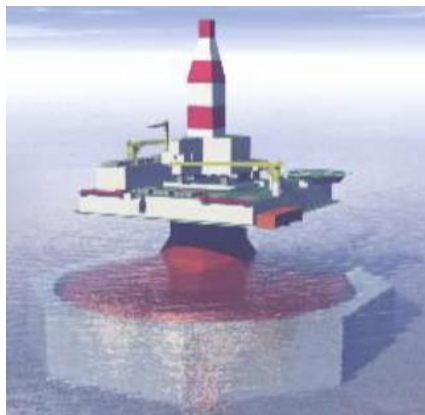
Mobile Arctic Island (MAI) представляет собой концепцию перестройки корпуса танкера VLCC с усилением ледового пояса и внутренними ребрами жесткости, рассчитанную на ледовые нагрузки до 9 МН на метр ширины конструкции [12]. Преимуществом является низкая стоимость за счет утилизации судов.

1.2 Концептуальные погружные буровые установки (ПБУ)

Эволюция концепций ПБУ фокусируется на повышении их ледостойкости и адаптации к переменной глубине [13]. Ключевые разработки представлены рядом инновационных проектов.

КОМБУ ЦКБ «Коралл» (рис. 1) — комбинированная буровая установка, состоящая из верхнего стального ледостойкого модуля с коническим профилем (угол наклона 51°) и нижней железобетонной

подставки высотой до 30 м [1, 5, 7, 14, 15]. Это решение расширяет рабочий диапазон глубин до 60 м — рекорд для арктических ПБУ [5]. Прототипом верхнего модуля служит опорное основание СМЛОП «Варандей», успешно эксплуатировавшееся в Печорском море при толщине торосов до 2,9 м [7]. Симметричная октогональная форма подставки позволяет дифферентовку в любом направлении, а риск опрокидывания при погружении исключен за счет касания дна раньше критического крена [15].



**Рисунок 1. Комбинированная буровая установка КОМБУ ЦКБ
«Коралл» [15]**

Платформа Барышева (рис. 2) представляет собой свайно-гравитационную конструкцию с кессонной плитой круглой формы и центральной колонной конической формы в верхней части [11]. Через монтажные отверстия в кессонной плите в слабый грунт вибропогружаются сваи-оболочки большого диаметра. Такая схема обеспечивает устойчивость при ледовых нагрузках на слабых илистых грунтах [11].

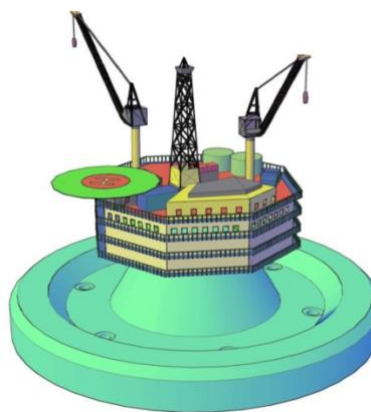


Рисунок 2. Свайно-гравитационная платформа Барышева [11]

Arctic Mobile Drill Structure (AMDS) — коническая платформа с электрообогревом верхней части конуса для предотвращения примерзания льда [5, 16]. Клиновидный конус снижает ледовую нагрузку на 30–40% за счет концентрации напряжений в зоне изгиба [16]. Периметральная юбка предотвращает подмыв основания и повышает устойчивость на слабых грунтах [5].

Arctic Cone Exploration Structure (ACES) (рис. 3) — коническая конструкция диаметром 168 м (наибольший среди аналогов) из облегченного предварительно напряженного железобетона со стальной надстройкой, рассчитанная на торосы толщиной до 20 м [13, 17]. Проект прошел детальное проектирование, но не был реализован из-за высокой стоимости [17].

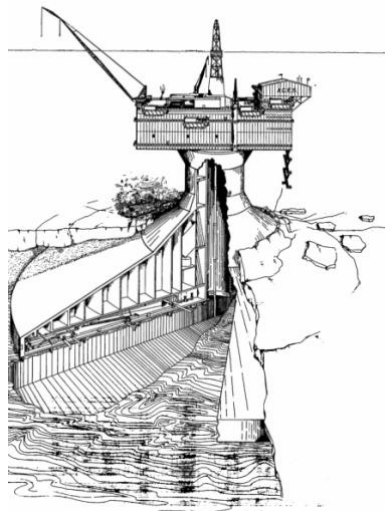


Рисунок 3. Коническая разведочная конструкция ACES (Arctic Cone Exploration Structure) [17]

Платформа Мусабирова (рис. 4) — инновационная модульная конструкция с донной балластируемой плитой (48×48×3 м) и цилиндрическим монопорным блоком («труба в трубе» с заполнением армированным бетоном) [18]. Особенностью являются сменные функциональные палубы (строительно-монтажная, буровая, эксплуатационная) с U-образными вырезами для стыковки с опорным блоком [18]. Глубина применения — от 4,75 м, расчетная ледовая нагрузка — до 100,83 МН [18]. Модульная конструкция сокращает сроки монтажа за

счет последовательной смены палуб в течение одного навигационного периода [18].

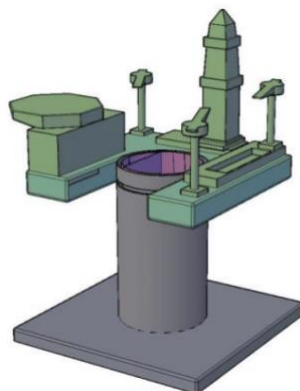


Рисунок 4. Модульная платформа Мусабирова со сменными палубами [18]

МЛБУ Вербитского — цельный железобетонный корпус с балластными отсеками, рассчитанный на лед толщиной до 2,5 м и торосы с осадкой киля до 20 м [19]. МЛБУ ЦКБ МТ «Рубин» (рис. 5) — свайно-гравитационная конструкция с возможностью заглубления защитного кессона ниже уровня грунта [8].



Рисунок 5. Морская ледостойкая буровая установка ЦКБ МТ «Рубин» [8]

Submersible drilling rig (вакуумные сваи) — концепция с вакуумными сваями двойного дна длиной 6 м и диаметром 4,8 м [20]. Сваи обеспечивают устойчивость на слабых грунтах за счет эффекта присасывания и служат

дополнительными понтонами при транспортировке. Расчетная толщина ровного льда — 2,5 м, период эксплуатации — 90 дней (сезон) [20].

Коническая платформа Esso Canada — конструкция с регулируемым положением конуса ($\pm 6,5$ м от ватерлинии) для восходящего или нисходящего разрушения льда [5, 21]. Электрообогрев поверхности конуса предотвращает смерзание со льдом. Расчетная ледовая нагрузка — 125 МН [21].

Платформа Esso (цилиндр) — вертикальный цилиндр высотой 24 м и диаметром 9 м на основании диаметром 97,5 м [5, 21]. Особенностью являются срезные ключи по периметру основания для контролируемого скольжения при перегрузке. Расчетное усилие — 135 МН (для тороса толщиной 14 м) [21].

RWACS — концепция с уменьшением площади ватерлинии для снижения ледовых и волновых нагрузок [22, 5]. Наклонные колонны позволяют снизить массу конструкции на 15–20%. Рассчитана на 18-метровый ровный лед и 5-метровые торосистые скопления [22].

SHADS (Shallow Arctic Drilling Structure) — трехблочная конструкция: стальной фундамент (131×131 м), комбинированный стально-железобетонный опорный блок с наклонными стенами и стальная надстройка [13]. Проектная ледовая нагрузка — 450 МН [13].

1.3 Концептуальные полупогружные буровые установки (ППБУ)

Разработка ледостойких ППБУ для глубоководных районов является приоритетным направлением для освоения шельфа Карского, Баренцева и Охотского морей [23, 24]. Инновационные концепции направлены на минимизацию ледовых нагрузок за счет оптимизированной геометрии корпуса и колонн.

JBF Arctic (рис. 6) — катамаранная ППБУ с тремя режимами осадки и восемью стабилизирующими колоннами [6, 25, 26]. Решетчатая конструкция между колоннами защищает райзер от льда [26]. Платформа рассчитана на работу при толщине льда до 2–3 м [6].



Рисунок 6. Катамаранная ППБУ JBF Arctic [26]

ППБУ-тримаран с турелью (рис. 7) — трехпонтонная схема с клиновидными носовыми оконечностями колонн [6, 25, 26]. Отсутствие пересекающих ватерлинию раскосов предотвращает образование ледовых «воротников» [26]. Боковые понтоны смещены в корму, что исключает заклинивание льда между колоннами [25]. Расчетная нагрузка от ровного льда (толщина 3 м) — 7,5 МН, от тороса — 16 МН [6]. Водоизмещение — 21 100 т [6].

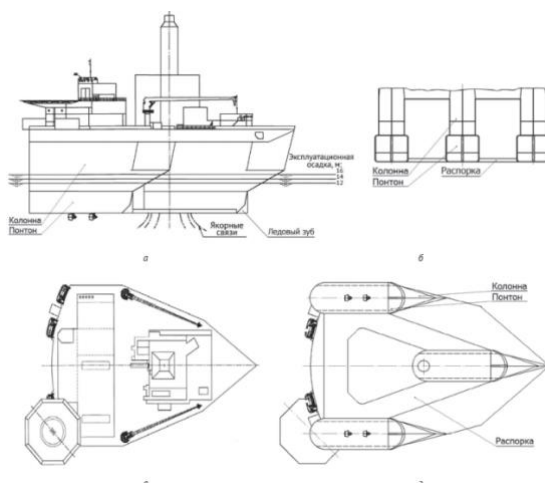


Рисунок 7. Трехпонтонная ППБУ с турельной системой удержания [26]

Клиновидная ППБУ ЦКБ «Коралл» — платформа с корпусом, аналогичным носовой части ледоколов класса Arc7 [23]. Длина — 111,9 м, ширина — 80,7 м, высота борта — 33 м. Турельная система удержания в носовой части обеспечивает автоматический разворот установки форштевнем навстречь льду/волнам. Глубина применения — до 400 м, водоизмещение — 43 873 т [23].

OCEAN 850 (рис. 8) — катамаранная ППБУ с четырьмя колоннами без раскосов в районе ватерлинии [7]. Увеличенное расстояние между колоннами минимизирует риск забивания межколонного пространства льдом. Снижение ледовой нагрузки на 20–30% по сравнению с цилиндрическими платформами. Работа в битом льду до 1,5 м [7].



Рисунок 8. Катамаранная ППБУ OCEAN 850 [7]

ГВА 7500 Арктик — ППБУ, классифицированная по правилам DNV как ICE 15 и ICE 1C, что обеспечивает работу в ледовых полях толщиной до 0,4 м и дрейфующих льдах до 1,5 м [3]. Система стабилизации — комбинированная: 16-точечное якорное закрепление + динамическое позиционирование с восемью подруливающими устройствами. Глубина бурения — до 12 000 м, диапазон глубин — 70–500 м [3].

ЦКБ «Коралл» ППБУ 6500/400 — ледостойкая ППБУ, спроектированная для арктического шельфа с якорной системой фиксации [3]. Выдерживает давление ледовых полей толщиной 0,3 м. Глубина установки — до 400 м, глубина бурения — до 6500 м [3].

ICE MAIDEN — концептуальная ППБУ с антиобледенительными системами (термообработка корпуса, механические дефлекторы) для работы в условиях многолетних льдов и айсбергов [5]. Статус — остался на стадии проектирования из-за высокой энергоемкости термосистем [5].

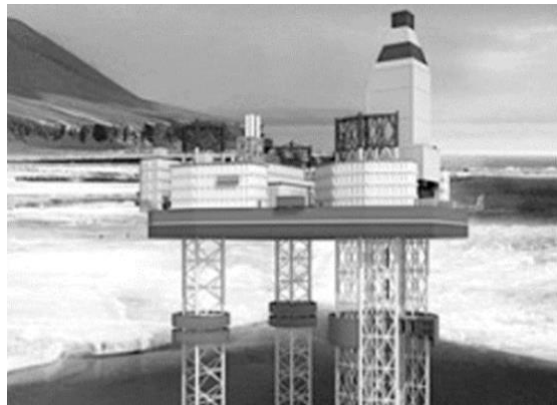
Arctic semi-submersible drilling unit — адаптивная конструкция с двумя режимами работы: мелководье (до 20 м) — установка на морское дно, глубоководье — швартовка с якорной системой [27, 5]. Ледозащита —

вертикальные колонны с комбинированными конусами. Расчетные параметры: ровный лед до 2 м, торосы до 25 м [27].

1.4 Концептуальные самоподъемные буровые установки (СПБУ)

Усовершенствования СПБУ для работы в тяжелых льдах направлены на усиление опорных колонн и механизмов подъема.

ЛСПБУ ЦКБ МТ «Рубин» (рис. 9) — ледостойкая самоподъемная буровая установка с цилиндрическими накладками высотой 8 м на опорных колоннах на уровне ватерлинии [28]. При толщине ровного льда до 1 м установка может работать круглогодично на глубинах до 40 м; при толщине до 0,3 м — на глубинах до 120 м [28].



**Рисунок 9. Ледостойкая самоподъемная буровая установка ЛСПБУ
ЦКБ МТ «Рубин» [28]**

Моноподная самоподъемная платформа — прямоугольная стальная платформа (78×65 м) с центральной цилиндрической колонной (Ø 9 м, высота 27 м) [29, 5, 30]. Система гидравлических домкратов поднимает корпус над водой на 52 м для защиты ото льда [29].

2 БИОНИЧЕСКИЕ И АКТИВНЫЕ СИСТЕМЫ ЗАКРЕПЛЕНИЯ

Наиболее инновационным направлением является заимствование принципов у живых организмов для создания эффективных систем закрепления на слабых грунтах [31, 32]. В таблице 1 представлены основные бионические концепции.

Таблица 1.

Бионические системы закрепления для арктических платформ

№	Биопрототип	Механизм	Инженерный аналог	Применение
1	Бритвенный моллюск	Циклы сжатия → плывун	RoboClam (MIT) [31]	Пульсирующий вакуумный кессон
2	Песчаная змея/эфа	Боковая ундуляция + разрезание песка	Змееробот UCSB	Сегментированная вибрирующая юбка
3	Краб-морской крот	Ковшовые конечности, цикл «захват-сброс»	EMBUR (UC Berkeley) [32]	Активный кессон-землерой
4	Рыба-пескоройка	Реактивная струя + ввинчивание	Гидроразрыв	Гидрореактивный погружной модуль
5	Песчаный осьминог	Множественные локальные струи разжижения	— (концепт)	Мульти сопловая система под юбкой
6	Северный олень	Противоскользкий мех на копытах	«Стопа оленя» [31]	Щетинистое покрытие опорной юбки

Наиболее проработанной является концепция RoboClam, разработанная в Массачусетском технологическом институте [31]. Экспериментально доказано, что при оптимальной скорости погружения затраты энергии снижаются в десятки раз по сравнению с «сухим» трением. Эта технология может быть масштабирована для создания вакуумно-пульсационных кессонов, работающих в цикле: сжатие → сброс → разрежение → втягивание воды.

Другая перспективная разработка — бионический корневой анкер с активным ростом (патент CN120311742) [31]. В пробуренную скважину вводится полый корпус с перфорированными стенками, под давлением подается быстротвердеющий компаунд, проникающий в поры и трещины слабого грунта и создающий «корневую систему». При необходимости извлечения компаунд разрушается вибрацией [31].

Адаптивная опора-присосок (Cephalopod-inspired Suction Pad) заимствует принцип у головоногих моллюсков [31]. На нижней поверхности

опорной конструкции размещается массив гибких «чаш-присосок» из эластомера. При контакте с грунтом из них откачивается вода, создавая локальное разрежение. В отличие от большого вакуумного кессона, множество малых присосок не теряют герметичность при локальном нарушении контакта [31].

3 РЕЗУЛЬТАТЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

В данном разделе представлена сводная таблица концептуальных проектов.

Таблица 2.

Сводные параметры концептуальных решений для разведочного бурения в Арктике

Название	Тип	Макс глубина, м	Ледовые условия	Инновация	Статус разработк и	Источн ики
Системы термостабилизации	Основа ние	любая	Многолетнемерзлые грунты	Активное охлаждение до -30°C	Патентная разработка	[9]
КМК (Кессонно-модульный комплекс)	Основа ние	любая	—	Сборка из ЖБ секций	Концепт	[5, 10]
Гибридные гравитационно-свайные основания	Основа ние	любая	Слабые грунты	Плита + короткие сваи	Концепт	[11]
Mobile Arctic Island (MAI)	Основа ние	23	Нагрузка до 9 МН/м	Конверсия танкера VLCC	Концепт 1984 г.	[12]
КОМБУ ЦКБ «Коралл»	ПБУ	60	Торосы до 2,9 м, t° до -44°C	Верхний модуль +	Проект	[1, 5, 7, 14, 15]

Название	Тип	Макс глубина, м	Ледовые условия	Инновация	Статус разработк и	Источн ики
				ЖБ подставка		
Платформа Барышева	ПБУ	12	Лед 0,5–1,5 м	Свайно- гравитацио нная, вибропогру жение	Концепт	[11]
AMDS (Arctic Mobile Drill Structure)	ПБУ	18	Торосы до 4 м	Электрообо грев конуса, периметрал ьная юбка	Концепт	[5, 16]
ACES (Arctic Cone Exploration Structure)	ПБУ	33	Торосы до 20 м	Коническая ЖБ конструкци я Ø168 м	Детальное проектиро вание	[13, 17]
Платформа Мусабилова	ПБУ	16,4	Нагрузка до 100,83 МН	Сменные функционал ьные палубы	Концепт	[18]
МЛБУ Вербитского	ПБУ	50	Лед до 2,5 м, торосы до 20 м	Цельный ЖБ корпус	Концепт	[19]
МЛБУ ЦКБ МТ «Рубин»	ПБУ	25	Лед 2–5 м, торосы до 12 м	Заглублени е защитного кессона	Концепт	[8]
SHADS (Shallow Arctic Drilling Structure)	ПБУ	20	Проект 450 МН	3-блочная конструкци я	Концепт	[13]
ASTERIX	ПБУ	18	—	—	Концепт	[13]

Название	Тип	Макс глубина, м	Ледовые условия	Инновация	Статус разработк и	Источн ики
ArCoP (Arctic Composite Platform)	ПБУ	20	Многолетние льды и торосы	ЖБ корпус + стальные элементы	Концепт	[13]
МЛБУ Франция	ПБУ	20	Нагрузка 5–8 МН/п.м	ЖБ база + усеченные конусы	Концепт	[13]
МЛБУ «Доум Петролиум»	ПБУ	76	Лед до 3 м, торосы до 30 м	30–40 штифтовых замков	Концепт	[13]
МЛБУ «Империял Ойл»	ПБУ	41	Давление на лед 8,4 МПа	Фундамент Ø107 м, 24 отсека	Концепт	[13]
RWACS	ПБУ	20	Ровный лед 18 м, торосы 5 м	Уменьшени е площади ватерлинии	Концепт	[5, 22]
Платформа Esso (цилиндр)	ПБУ	—	Нагрузка 135 МН (торос 14 м)	Срезные ключи, кольцевой пояс	Концепт	[5, 21]
Моноподная самоподъемн ая платформа	ПБУ	27	Давление торосов	Подъем на 52 м, 4 гидродомкр ата	Концепт	[5, 29, 30]
Коническая платформа Esso Canada	ПБУ	41	Нагрузка 125 МН	Регулируем ый конус ±6,5 м	Концепт	[5, 21]
Submersible drilling rig (вакуумные сваи)	ПБУ	10	Ровный лед 2,5 м	Вакуумные сваи, понтонный режим	Концепт	[20]

Название	Тип	Макс глубина, м	Ледовые условия	Инновация	Статус разработк и	Источн ики
BAVARIA	ПБУ	6	—	—	Концепт	[10, 5]
US 4,260,292	ПБУ	30	Подогрев стенки	Принудител ьная конвекция	Концепт	[9]
Коническая платформа (грунтозацеп ы)	ПБУ	50	Давление полей до 1,2 м	Грунтозаце пы, буровая шахта	Концепт	[33]
CFEC (Cylinder Floating Extendable)	ПБУ	50	—	Телескопич еский цилиндр	Концепт	[34]
JBF Arctic	ППБУ	1500	Лед 2–3 м	Три режима осадки, 8 колонн	Концепт	[6, 25, 26]
ППБУ- тримаран с турелью	ППБУ	450	Ровный лед 3 м (7,5 МН), торосы (16 МН)	Клиновидн ые колонны	Концепт	[6, 25, 26]
Клиновидная ППБУ ЦКБ «Коралл»	ППБУ	400	Лед 3 м (класс Arc7)	Корпус ледокольно го типа, турель	Концепт	[23]
OCEAN 850	ППБУ	600	Битый лед до 1,5 м	Отсутствие расколов в ватерлинии	Концепт	[7]
ГВА 7500 Арктик	ППБУ	500	Поля до 0,4 м, дрейф до 1,5 м	DNV ICE 15/1С, 16 якорей + DP	Концепт	[3]

Название	Тип	Макс глубина, м	Ледовые условия	Инновация	Статус разработк и	Источн ики
ЦКБ «Коралл» ППБУ 6500/400	ППБУ	400	Поля толщиной 0,3 м	Якорная система	Концепт	[3]
ICE MAIDEN	ППБУ	>200	Многолетние льды и айсберги	Термообраб отка, дефлекторы	Проектиро вание	[5]
Arctic semi- submersible drilling unit	ППБУ	20+	Ровный лед 2 м, торосы до 25 м	Двойной режим (дно/якоря)	Инженерна я проработка	[5, 27]
ЛСПБУ ЦКБ МТ «Рубин»	СПБУ	40	Лёд свыше 2,0 м	Цилиндрич еские накладки высотой 8 м	Концепт	[28]

4 ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Проведенный анализ концептуальных технических решений позволяет сформулировать следующие выводы и рекомендации:

1. Гибридные платформы с переменной осадкой (КОМБУ ЦКБ «Коралл») являются наиболее перспективным направлением для расширения рабочего диапазона глубин до 60 м [1, 5, 15]. Модульная конструкция с верхним ледостойким модулем и нижней ЖБ подставкой позволяет адаптировать установку к различным глубинам и ледовым условиям.

2. Модульные конструкции со сменными палубами (платформа Мусабирова) обеспечивают сокращение сроков монтажа на 40% за счет последовательной смены функциональных палуб в течение одного навигационного периода [18]. Это критически важно для короткого арктического лета.

3. Бионические системы закрепления (RoboClam, корневые анкеры, адаптивные присоски) представляют собой наиболее инновационное направление для работы на слабых грунтах [31, 32]. Экспериментально доказано, что затраты энергии на погружение могут снижаться в десятки раз по сравнению с традиционными методами.

4. Для глубоководных районов наиболее перспективны ледостойкие ППБУ с клиновидной формой корпуса и турельными системами удержания, позволяющими автоматически ориентироваться относительно направления дрейфа льда [23, 25]. Примером являются разработки ЦКБ «Коралл» и проекты типа JBF Arctic [26].

5. Активные системы термостабилизации и антиадгезионные покрытия должны стать обязательными элементами проектов в районах с многолетнемерзлыми грунтами и интенсивным ледообразованием [9]. Электрообогрев конических поверхностей и использование термосвай с хладагентом позволяют предотвратить смерзание и термокарстовые просадки.

6. Усиление СПБУ цилиндрическими накладками на опорных колоннах (ЛСПБУ ЦКБ МТ «Рубин») позволяет расширить сезонность эксплуатации и повысить ледостойкость при сохранении мобильности [28].

7. Приоритетные направления для дальнейших исследований: верификация бионических систем в ледовых бассейнах, разработка цифровых двойников гибридных платформ, оптимизация форм корпусов ППБУ для снижения ледовых нагрузок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Систематизация концептуальных технических решений для разведочного бурения в Арктике показывает, что инженерная мысль движется в направлении гибридизации, модульности и бионического заимствования. Наиболее перспективными направлениями являются: комбинированные платформы с переменной осадкой (КОМБУ), модульные конструкции со сменными палубами (платформа Мусабилова), бионические

системы закрепления на слабых грунтах (RoboClam, корневые анкеры), ледостойкие ППБУ с турельными системами удержания и активные системы термостабилизации грунтов. Конвергенция апробированных технологий и инновационных разработок позволит обеспечить безопасное и эффективное круглогодичное разведочное бурение в высоких широтах, снижая риски и стоимость проектов [2].

Использованные источники:

1. Хвалимова А.А. [и др.]. Выбор типа буровой установки для разведочного бурения в арктических условиях по методу анализа иерархий // Russian Journal of Water Transport. 2023. № 76. С. 61–74.
2. Савинов Ю.А., Ганжинова С.А. Перспективы российских шельфовых проектов в Арктике. 2017.
3. Добряков И.С. Выбор технологии и технических средств для разведочного и эксплуатационного бурения на шельфе Карского моря. 2011.
4. Хвалимова А.А., Благовидова И.Л., Иванова Н.С. Анализ применимости различных типов буровых установок для разведочного бурения в арктических условиях. 2022.
5. Frederking R.M.W. Exploration and production concepts and projects for the Arctic offshore. 1984.
6. Амосова Н.В. [и др.]. Концептуальные проектные решения для погружной комбинированной буровой установки для круглогодичного бурения в арктических условиях. 2021.
7. Хвалимова А.А., Благовидова И.Л., Иванова Н.С. Анализ применимости различных типов буровых установок для разведочного бурения в арктических условиях. 2022.
8. ЦКБ МТ «Рубин» — морские сооружения для освоения шельфа // Топливо-энергетический комплекс. URL: <https://www.tek-all.ru/>.
9. Steddum R.E. [и др.]. Arctic Offshore Platform. 1981. US Patent 4,260,292.

10. Anon. Design work on Sohio mobile structure nears completion // Ocean Industry. Vol. 19 (1). 1984. С. 39–40.

11. Барышев В.Н., Сабодаш О.А. Проектирование ледостойкой платформы для разведочного бурения в мелководной зоне арктических морей на слабых грунтах // Вестник инженерной школы ДВФУ. 2016. С. 7.

12. Anon. New concept uses tanker for drilling/storage // Ocean Industry. 1984. (19 (1)). С. 31–32.

13. Kulmach P.P. Marine platforms for polar offshore developments // Moscow: 25th Central Research Institute of Russian MoD. 1999. С. 366.

14. Ivanova O.A., Blagovidova I.L., Rodkina A.V. Sistema kriteriyev dlya sopostavleniya i otsenki primenimosti razlichnykh tipov burovnykh ustanovok v surovnykh klimaticheskikh usloviyakh // Nauchnyye problemy vodnogo transporta. 2020. С. 37–53.

15. Zhdaneyev O.V. [и др.]. Razvedochnoye bureniye na arkticheskom i dal'nevostochnom shel'fe Rossii // Arktika: ekologiya i ekonomika. 2020. С. 112–125.

16. Hancock J.A. [и др.]. Preliminary design of the Arctic mobile drilling structure // Proceedings 5th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC '79). Trondheim. 1979. (2). С. 1191–1204.

17. Byrd R.C. [и др.]. The arctic cone exploration structure: A mobile offshore drilling unit for heavy ice cover // Offshore Technology Conference. 1984. С. 203–214.

18. Мусабиров А.А. Разработка и исследование применимости новой конструкции ледостойких платформ на мелководном арктическом шельфе. Москва, 2013.

19. Verbitsky S.V., Lopashev P.A. Floating submersible drilling rigs for Arctic shelf // Transactions of Krylov State Research Centre. 2012.

20. Фаткулин А.А. Разработка ледостойкой мобильной буровой платформы для мелководного шельфа Арктики.

21. Jazrawi W., Davies J.F. A monopod drilling system for the Canadian Beaufort Sea // Society of Naval Architects and Marine Engineers (Ice Tech 75). 1975. С. 9–11.
22. Rirdy J. Houston company's deepwater designs combat problems of cost, environment // Alaska Construction and Oil. 1983. (24). С. 25–30.
23. Ковалёв М.В. [и др.]. Перспективная плавучая установка для разведочного бурения в арктических морях. 2020.
24. Крыжевич Г.Б. Проблемы проектирования и перспективы развития ледостойких полупогружных плавучих буровых установок // Arctic: Ecology and Economy. 2017. № 4(28). С. 108–117.
25. Крыжевич Г.Б. Концептуальные решения для ледостойких плавучих буровых установок, обеспечивающие круглогодичную эксплуатацию в Арктике.
26. Плавучие полупогружные буровые установки: история, современность, перспективы: Аналитический обзор // Крыл. гос. науч. центр. 2014. С. 212.
27. Corona E.N., Yashima N. Development of a novel ice-resistant semi-submersible drilling unit // Proceedings Fifteenth Annual Offshore Technology Conference. 1983. С. 189–196.
28. Appolonov Ye.M., Lensky V.F. Jack-up drilling rigs: history, state of the art, prospects. Analytical review // Under general editorship. 2013. С. 206.
29. Annon. Global Marine designs rigs for Arctic work // Offshore. Vol. 42. 1982. С. 86–95.
30. Raye F.G. Exploration prospects and future petroleum potential of the Canadian Arctic Islands. 1981.
31. Патент CN120311742. Offshore floating type photovoltaic bionic anchoring foundation. 2025.
32. Yoon G.S. Model test for pulling out resistance of the self expandable pile anchor // Korea-U.S. Seminar for Offshore Aquaculture Tech. 2004. P. 39–45.

33. Мовсум-заде Э.М. [и др.]. Морская нефть // Развитие технических средств и технологий / под ред. А.М. Шаммазова. 2005.

34. Zhirong Wu. Straight cylinder type floating platform with extension cylinder body, and swim ring type buoy group. 2017.